

基于一维综合孔径微波辐射计的大气海洋环境参数敏感性分析

冯梦延¹, 艾未华¹, 刘茂宏¹, 陈冠宇², 陆文¹

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 210000; 2. 中国人民解放军 32033 部队, 海南 海口 570100)

摘要: 相比于实孔径微波辐射计, 一维综合孔径微波辐射计具有高空间分辨率和多入射角观测特点。本文提出采用观测频率为 6.9, 10.65, 18.7, 23.8 和 36.5 GHz, 且入射角范围为 $0^\circ\sim 65^\circ$ 的一维综合孔径微波辐射计遥感大气海洋环境要素。基于构建的微波大气海洋辐射传输正演模型, 分析了辐射计亮温对大气海洋环境要素的敏感性, 为辐射计关键指标确定和大气海洋环境要素反演算法设计提供技术支持。结果表明: 一维综合孔径微波辐射计的垂直和水平极化亮温对大气海洋环境要素的敏感性表现出不同特性, 且敏感性随入射角的改变而变化显著; 6.9 和 10.65 GHz 对海面温度的敏感性较大, 且随着入射角的增大, 垂直极化亮温的敏感性增大, 水平极化亮温的敏感性减小; 10.65 和 18.7 GHz 对海面风速的敏感性相对较大, 且敏感性最大的风速区间位于 10~20 m/s; 23.8 GHz 对大气水汽含量最敏感, 且水汽含量较低、入射角较大时, 敏感性越大; 36.5 GHz 对云液态水含量最敏感, 随着入射角的增大, 垂直极化亮温的敏感性减小, 水平极化的敏感性增大, 但两者均在液态水含量较小时表现出较大的敏感性。

关键词: 一维综合孔径微波辐射计; 高空间分辨率; 多入射角; 敏感性分析

中图分类号: P715.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)08-0047-13

DOI: 10.11759/hyxx20200720007

地球表面约三分之二的面积被海洋覆盖。获取海洋环境信息对研究全球气候具有重要的作用。虽然浮标等测量方式可以获得较高精度的海洋环境信息, 但是其不能满足长期的, 大尺度范围的数据需求^[1]。因此, 利用微波辐射计获取海面温度、海面风场、大气水汽含量和云液态水含量成为重要方式^[2-4]。

目前, 可以提供海洋环境产品的星载微波辐射计主要包括 TMI、WindSat、AMSR2、HY-2, 其均为实孔径微波辐射计, 且入射角为一个定值。由于空间分辨率和天线尺寸成反比, 导致传统实孔径微波辐射计的空间分辨率较低。例如, WindSat 和 AMSR2 上的 C 波段通道, 其空间分辨率大约为 $50\text{ km}^{[5-6]}$ 。所以, Schanda 提出了将综合孔径方法应用到遥感领域来解决空间分辨率与天线物理尺寸之间的固有矛盾^[7], 其原理与综合孔径射电望远镜类似^[8]。

一维综合孔径微波辐射计用一维的小孔径天线阵列代替大的实孔径天线, 对相隔一定距离的天线对进行复相关运算可以测量场景辐射的空间频率分量^[9]。小天线观测信号的复相关输出称为可见度函数, 通过对可见度函数进行傅里叶变换获得亮温图像^[10]。相比于实孔径微波辐射计, 由于不同小天线对应不同的入射角, 其合成的亮温图像是在多个

入射角处的亮温组合。图 1 为星载一维综合孔径微波辐射计的观测示意图。

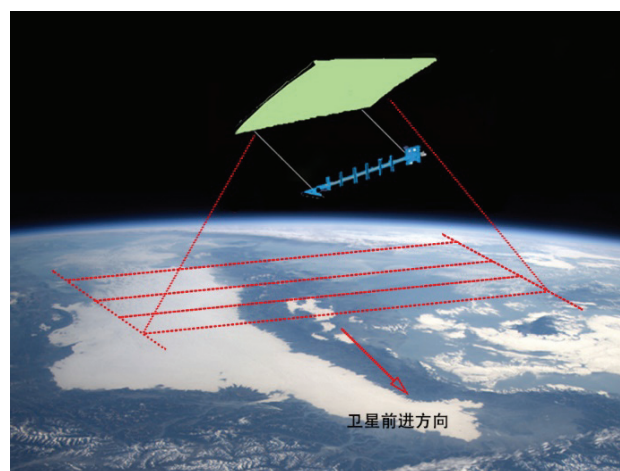


图 1 星载一维综合孔径微波辐射计的观测示意图

Fig. 1 Schematic of the scan process of the spaceborne one-dimensional synthetic aperture microwave radiometer

收稿日期: 2020-07-20; 修订日期: 2020-12-17

基金项目: 国家自然科学基金 (41475019, 41705007)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China with the grant number, Nos. 41475019, 41705007]

作者简介: 冯梦延(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋微波遥感研究, E-mail: a1044175130@163.com; 艾未华(1979—), 通信作者, 博士, 副教授, E-mail: awhzjax@126.com。

为了获取高空间分辨率的海洋环境产品, 本文提出采用星载一维综合孔径微波辐射计获得海洋环境参数。假设该一维综合孔径微波辐射计的观测频点为: 6.9、10.65、18.7、23.8 和 36.5 GHz, 且每个频点为 v 、 h 双极化模式。由于场景辐射亮温随入射角变化很大, 例如当入射角出现 1° 的误差时, 海面温度的反演值会出现 6°C 的误差^[6], 所以, 对于一维综合孔径微波辐射计, 在不同入射角处研究亮温对海洋环境要素的敏感性具有重要意义。目前, 许多学者针对固定入射角的实孔径微波辐射计开展了一系列敏感性研究^[11-12]; 陈冠宇等针对 C 波段的单频点一维综合孔径微波辐射计, 开展了若干入射角的敏感性分析^[13]。本文基于辐射传输正演模型, 仿真了 5 个频点在 $0^\circ\sim 65^\circ$ 入射角范围内的辐射亮温。其次, 计算了 $0^\circ\sim 65^\circ$ 入射角范围内亮温对海面温度、海面风速、海面风向、水汽含量和云液水含量的敏感性。

1 海洋大气辐射传输正演模型

如图 2 所示, 大气顶向外出射的辐射亮温 $T_{B,p}$ 可以表示为^[14-15]:

$$\begin{aligned} T_{B,p} &= T_{BU} + \tau \times E_p \times T_S + \tau \times T_{B\Omega}, \\ T_{B\Omega} &= R_p \times [T_{BD} + \tau \times T_{\text{cold}}] + T_{B,\text{scat},p}, \\ T_{B,\text{scat},p} &= \Omega_p(\tau, W) \times [T_{BD} + \tau \times T_{\text{cold}} - T_{\text{cold}}] \times R_p, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, p 为极化方式, $p = v, h$ 。 T_{BU} 和 T_{BD} 分别表示大气辐射的上行和下行亮温, τ 为整层大气透过率, E_p 为海面发射率(由海面发射率模型计算)。 T_S 为海面温度。 $R_p = 1 - E_p$ 表示海面反射率。 $T_{B\Omega}$ 为大气下行亮温和宇宙背景亮温被海面反射和散射的辐射值。 T_{cold} 为宇宙背景亮温, 通常取 2.73 K 。 Ω_p 表示被海面散射下行辐射的经验校正系数, 与频率 f , 入射角 θ , 透过率 τ 和风速 W 有关。 $T_{B,\text{scat},p}$ 表示非平静海面对大于或小于入射角方向的大气辐射亮温的散射作用。

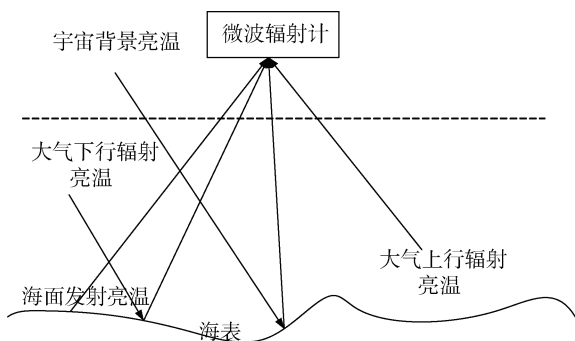


图 2 大气顶出射亮温示意图

Fig. 2 Schematic of the atmospheric top emission brightness temperature

1.1 海面发射率模型

海面发射率模型是本文研究的基础。目前, 计算海面发射率的物理模型主要包括: 双尺度模型^[16]、光学模型^[17]和小斜率近似模型(SSA)^[18]。这些模型计算复杂且精度较低, 不能满足研究需求。本文采用 Meissner 等建立的海面发射率模型^[14], 该模型是以星载微波辐射计 WindSat、SSM/I F13 亮温数据, QuikSCAT、ncep、HRD 的风速风向数据以及 Reynolds OI 海面温度数据等为基础构建的经验海面发射率模型。该模型可以计算 $0^\circ\sim 65^\circ$ 入射角范围内和 $-2\sim 40^\circ\text{C}$ 海面温度范围内的海面发射率 E_p ^[14]。该模型将海面发射率分成 3 个部分, 分别为平静海面发射率 $E_{0,p}$, 由风速 W 引起的发射率增量 $\Delta E_{W,p}$ 和由风向 φ 引起的发射率增量 $\Delta E_{\varphi,p}$ 。如下所示:

$$E_p = E_{0,p} + \Delta E_{W,p} + \Delta E_{\varphi,p}, \quad (2)$$

其中, $E_{0,p}$ 是频率 f , 入射角 θ , 海面温度 T_S 和海面盐度 S 的函数, 由 Fresnel 定律计算得到^[14, 19]。 $\Delta E_{W,p}$ 和 $\Delta E_{\varphi,p}$ 分别与风速和风向有关, 具体算法参考^[14]。

1.2 大气吸收发射模型

在非降水大气条件下, 气溶胶等粒子对微波的散射可以忽略。在低于 100 GHz 的频率范围内, 主要的吸收成分为氧气、水汽和液态水。 T_{BU} , T_{BD} 和 τ 可以根据大气廓线计算得到^[20-21]。由于该方法计算速度慢, 本文采用 Wentz 经验模型^[6]计算 T_{BU} , T_{BD} 和 τ ^[6], 其以频率 f , 入射角 θ , 海面温度 T_S , 总柱液态水含量 L 和总柱水汽含量 V 为输入。需要说明的是, 由于该模型^[6]中计算云液态水吸收系数的算法需要输入云的平均温度 T_L , 且该数据很难获得, 所以, 本文采用公式(3)计算云液态水吸收系数^[12]:

$$A_L = b_{L0}(1 + b_{L1}V)L. \quad (3)$$

一维综合孔径微波辐射计同时观测目标场景在多个入射角的辐射值, 且各个方向的辐射值相互独立。本文采用的辐射传输正演模型适用于一维综合孔径微波辐射计系统。金梦彤等利用微波辐射传输正演模型^[22]仿真了星载一维综合孔径微波辐射计遥感海面盐度的亮温值^[23]; 刘泽霖^[24]在研究综合孔径微波辐射计反演大气温度廓线时也采用了 DOTLRT 模型^[25]仿真了亮温值。

2 亮温对大气海洋环境要素的敏感性分析

大气海洋环境参数的变化会引起大气层顶出射

辐射亮温的改变, 不同参数的变化对辐射亮温的影响不同。本文定义敏感性系数 $S_{i,\theta}^f$, 公式如下:

$$S_{i,\theta}^f = \left| \frac{\partial T_{B,p,\theta}^f}{\partial M_i} \right|, \quad (4)$$

其中, $M_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 分别表示海面温度, 海面风速, 海面风向, 水汽含量和云液态水含量。 $\partial T_{B,p,\theta}^f$ 为辐射亮温, $p = v, h, 0^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ 。

表 1 大气海洋环境要素值

Tab. 1 Atmospheric and oceanic environmental parameters

场景	S	T_S / K	$W / (m \cdot s^{-1})$	$\varphi / (^\circ)$	V / mm	L / mm
场景 1	35	273.15~313.15	15	45	30	0.1
场景 2	35	298	0~30	45	30	0.1
场景 3	35	298	15	0~360	30	0.1
场景 4	35	298	15	45	0~50	0.1
场景 5	35	298	15	45	30	0~0.2

2.1 亮温对海洋环境要素的敏感性分析

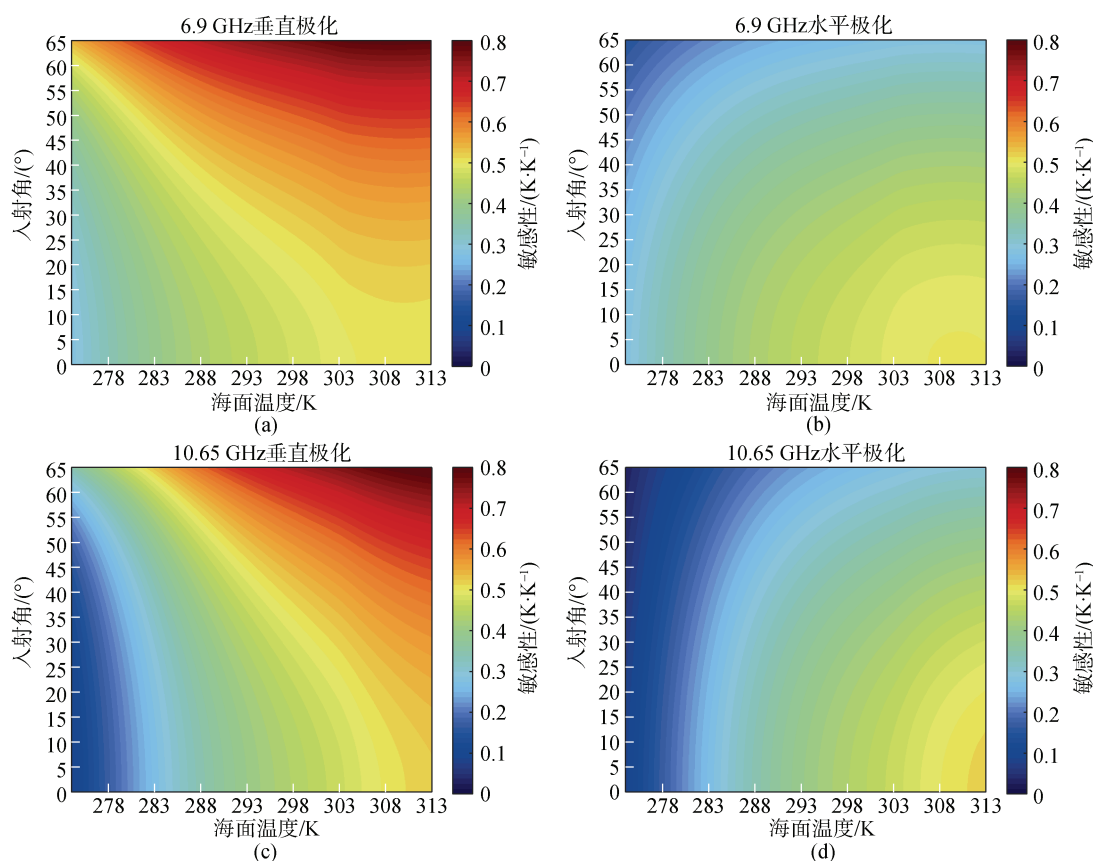
海洋环境要素的变化会直接影响海面发射率的变化, 从而造成辐射计观测亮温的改变。在不同入射角处, 不同的观测频率对海洋环境要素的敏感性不同。理论上, 敏感性越大, 反演精度越高。本节首先

为了定量计算亮温对海洋环境要素的敏感性大小, 本文假设了 5 个环境场, 如表 1 所示。以环境场为基础, 用辐射传输正演模型计算大气顶出射的辐射亮温, 根据公式(4)计算亮温对大气海洋环境要素敏感性。由于海水盐度 S 对该一维综合孔径微波辐射计的观测频率影响很小, 本文将海水盐度 S 设为常数。海面风速和海面风向为海面 10 m 风速和风向。风向为风矢量与卫星观测方位的夹角, 顺风时为 0° , 逆风时为 180° 。

计算亮温对海洋环境要素的敏感性系数, 根据场景 1, 2, 3, 利用辐射传输正演模型分别计算亮温对海面温度, 海面风速, 海面风向的敏感性系数。

2.1.1 海面温度敏感性分析

图 3 为亮温对海面温度在 $0^\circ \sim 65^\circ$ 入射角范围内的



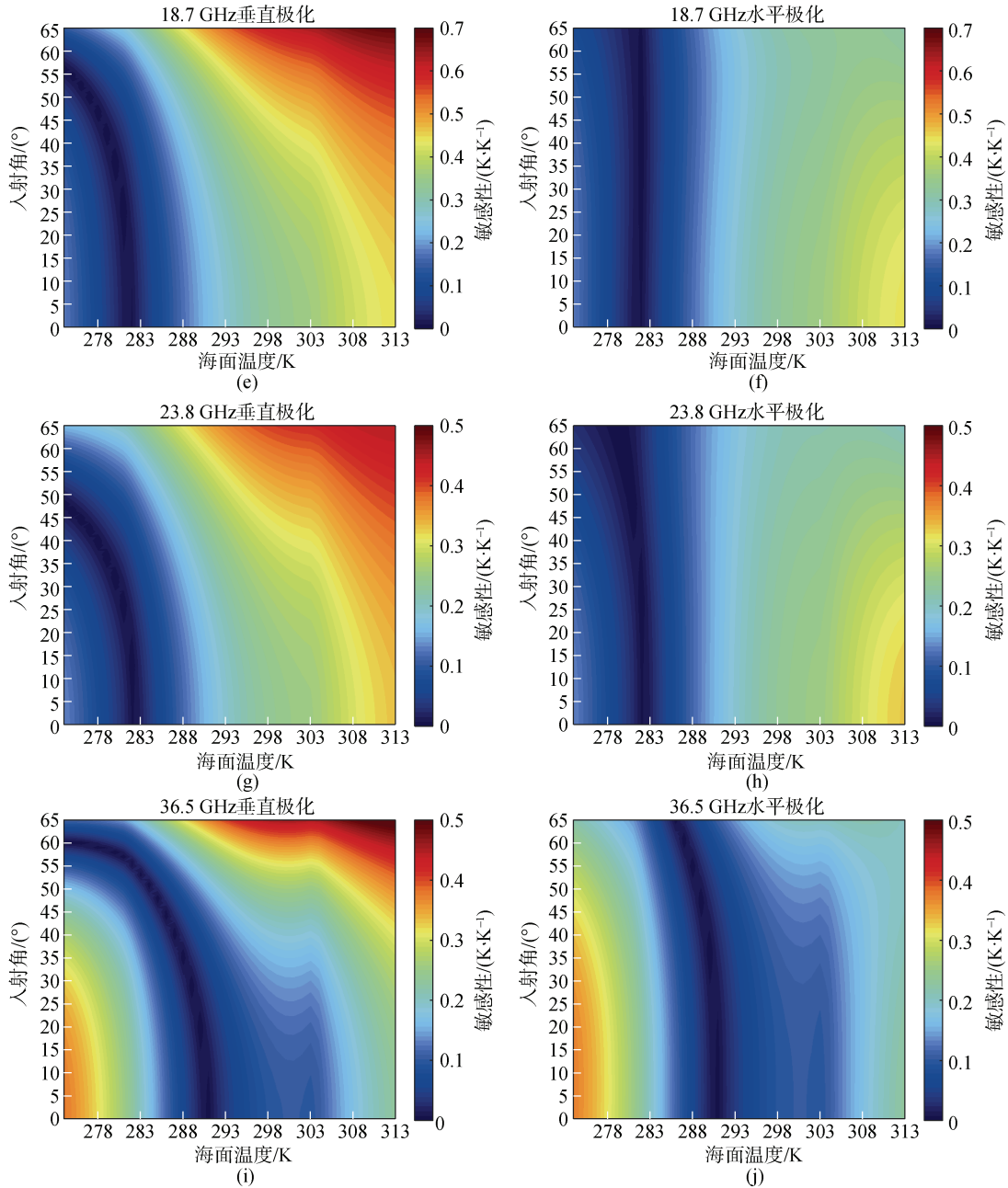


图 3 亮温对海面温度的敏感性

Fig. 3 Sensitivity of the brightness temperature to the sea surface temperature

敏感性。从图 3 可以看出, 垂直极化亮温对海面温度的敏感性略大于水平极化亮温。6.9 GHz 和 10.65 GHz 对海面温度的敏感性表现相似且 6.9 GHz 和 10.65 GHz 对海面温度的敏感性较高。6.9 和 10.65 GHz 的垂直极化和水平极化亮温对海面温度的敏感性随海面温度的增加而增加, 但是 18.7, 23.8, 36.5 GHz 的垂直极化和水平极化亮温对海面温度的敏感性随海面温度先减小后增加, 如图 3i 和 3j 所示, 敏感性系数的最小值没有出现在海面温度最小值处。

6.9 和 10.65 GHz 的垂直极化亮温对海面温度的敏感性随入射角的增加而增加, 其水平极化亮温对海面温度的敏感性随入射角的增大而减小。18.7, 23.8, 36.5 GHz 的垂直极化亮温对海面温度的敏感性与入射角的关系在不同的海面温度范围内表现不同。例如, 图 3g 中显示, 在 $T_S < 283$ K 内, 敏感性随入射角的增大先减小后增大, 但是在 $283 \text{ K} \leq T_S \leq 313$ K 内, 敏感性随入射角的增大持续增大。总体上, 18.7, 23.8, 36.5 GHz 的水平极化亮温对海面温度的敏感性随入射角的增大而减小。

36.5 GHz 的水平极化亮温对海面温度的敏感性在低海面温度处达到最大, 这与其他频点的表现相反。

从海面温度反演的角度分析, 6.9 GHz 是核心频率, 其次是 10.65 GHz, 这与许多研究者得到的结论一致^[6, 26-28]。垂直极化亮温对海面温度反演的贡献主要在高海温和大入射角处。36.5 GHz 垂直极化亮温在 $T_s \leq 278$ K 和 $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ 也有较大的贡献。除了 36.5 GHz, 水平极化亮温对海面温度反演的贡献主要在高海温和小入射角处, 而 36.5 GHz 水平极化亮温对海面温度反演的贡献主要在低海温和小入射角处。

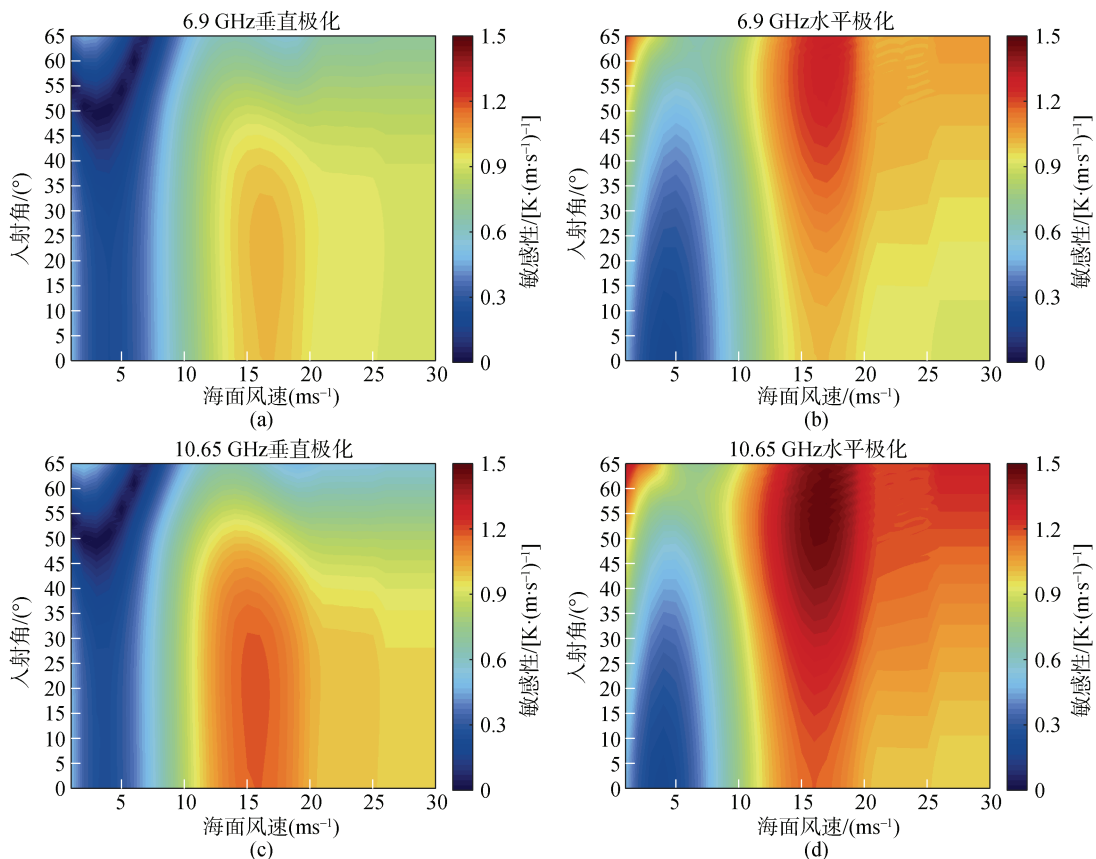
2.1.2 海面风场敏感性分析

图 4 为亮温对海面风速在 $0^\circ \sim 65^\circ$ 范围内的敏感性。从图中可以看出, 水平极化亮温对海面风速的敏感性大于垂直极化亮温。总体来看, 10.65, 18.7 和 36.5 GHz 对海面风速的敏感性较大, 23.8 GHz 的敏感性最小。在 $12 \text{ m/s} \leq W \leq 25 \text{ m/s}$ 和 $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 范围内, 垂直极化亮温对海面风速的敏感性较大。10.65, 18.7 和 36.5 GHz 垂直极化亮温对海面风速的敏感性大于 6.9 和 23.8 GHz。在 $25 \text{ m/s} \leq W \leq 30 \text{ m/s}$ 范围内, 垂直极化亮温对海面风速的敏感性随海面风速的增加几乎不变, 这说明在 $25 \text{ m/s} \leq W \leq 30 \text{ m/s}$ 范围内,

风速与亮温呈线性关系, 但是其随入射角的增大而减小。

所有频点的水平极化亮温对海面风速的敏感性表现相似。与垂直极化亮温相比, 水平极化亮温对海面风速的敏感性在 $0 \text{ m/s} \leq W \leq 5 \text{ m/s}$ 和 $55^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ 范围内也存在极大值。例如, 在图 4f 中, 当风速为 1 m/s 且入射角为 65° 时, 水平极化亮温对海面风速的敏感性为 $1.902 \text{ K}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。与垂直极化亮温类似, 在 $25 \text{ m/s} \leq W \leq 30 \text{ m/s}$ 范围内, 水平极化亮温对海面风速的敏感性随海面风速的增加几乎不变, 但是其随入射角的增大而增大。

具有较大敏感性的区间, 其海面风速反演精度更高。综上所述, 6.9, 10.65, 18.7 GHz 垂直极化亮温对反演海面风速的贡献主要在 $10 \text{ m/s} \leq W \leq 30 \text{ m/s}$ 和 $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 。23.8, 36.5 GHz 垂直极化亮温对反演海面风速的贡献主要在 $10 \text{ m/s} \leq W \leq 25 \text{ m/s}$ 和 $0^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$ 。6.9, 10.65, 18.7 和 36.5 GHz 水平极化亮温对反演海面风速的贡献主要在 $12 \text{ m/s} \leq W \leq 30 \text{ m/s}$ 和 $0^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$; $0 \text{ m/s} \leq W \leq 5 \text{ m/s}$ 和 $50^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ 。23.8 GHz 水平极化亮温对反演海面风速的贡献主要在 $10 \text{ m/s} \leq W \leq 25 \text{ m/s}$ 和 $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$; $0 \text{ m/s} \leq W \leq 5 \text{ m/s}$ 和 $50^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ 。



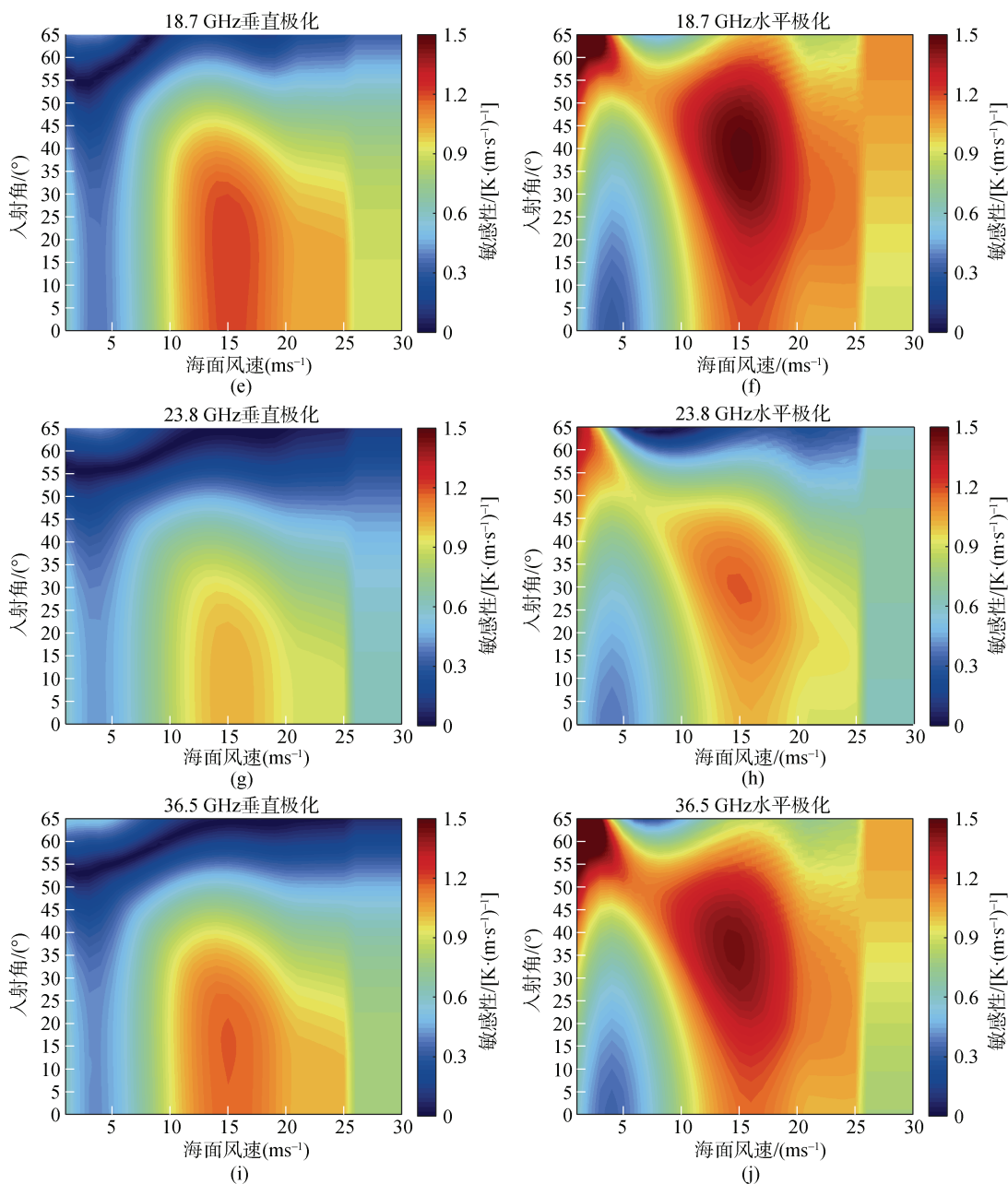


图 4 亮温对海面风速的敏感性

Fig. 4 Sensitivity of the brightness temperature to the sea surface wind speed

图 5 为亮温对海面风向在 $0^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 内的敏感性。从图中可以看出亮温对海面风向的敏感性较小。图 5 为轴对称图形且对称轴为 $\theta \leq 180^{\circ}$ 。18.7 和 36.5 GHz 的垂直极化和水平极化亮温对海面风向的敏感性较高，但是最大值均小于 0.05 K° 。

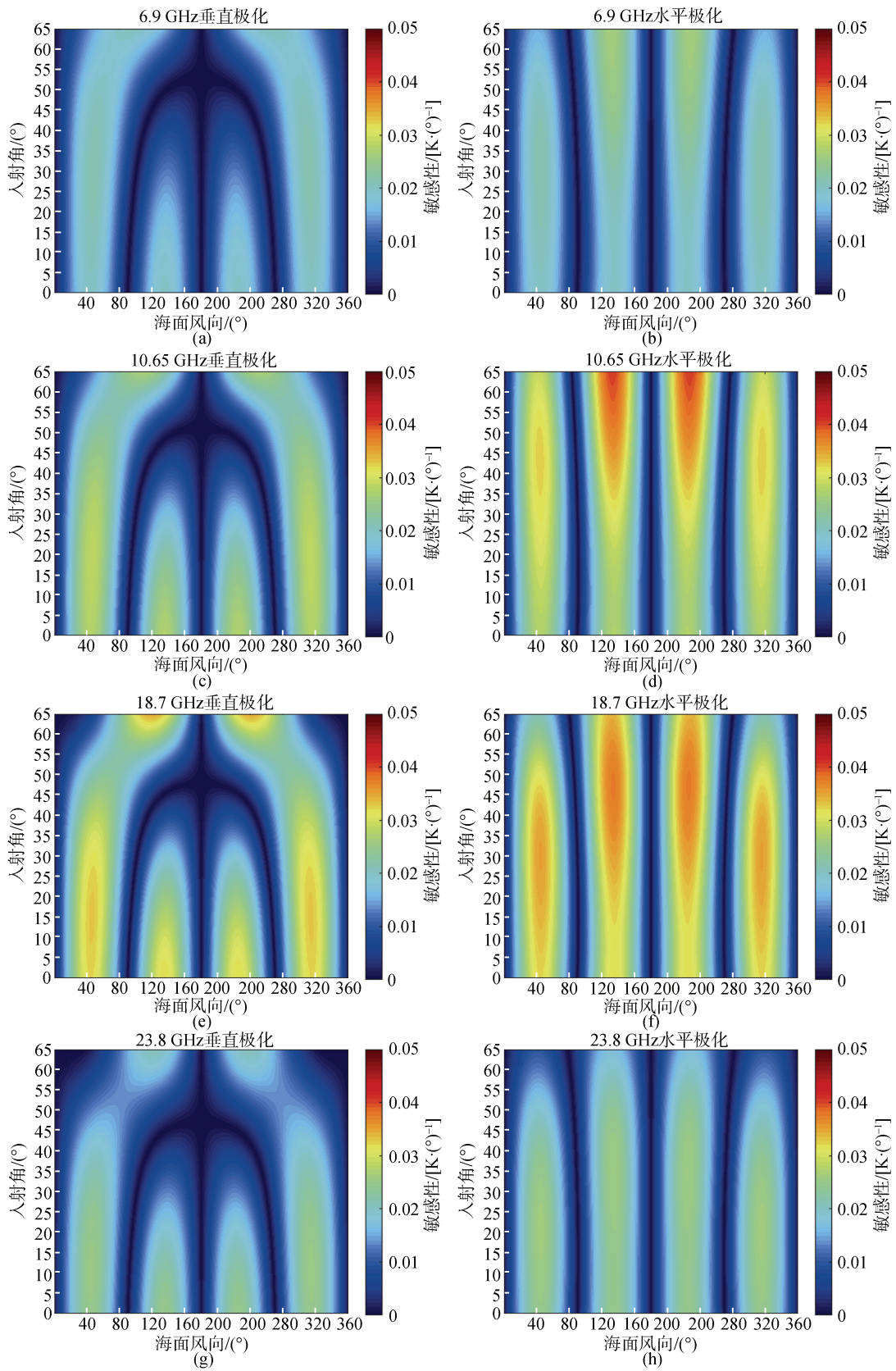
2.2 亮温对大气参数的敏感性分析

根据无散射条件下的辐射传输方程，星载一维综合孔径微波辐射计接受的辐射包括水汽和云液

态水的辐射信息。水汽和液态水直接影响大气透过率和大气辐射亮温，从而间接影响辐射计的观测亮温。为了量化大气参数对辐射计观测亮温的影响，本节根据场景 4 和场景 5 分别计算亮温对水汽含量和云液态水含量的敏感性。

2.2.1 水汽含量敏感性分析

图 6 为亮温对大气水汽含量在 $0^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 范围内的敏感性。从图中可以看出，水平极化亮温对大气水汽含量的敏感性大于垂直极化亮温。6.9 和 10.65 GHz 对



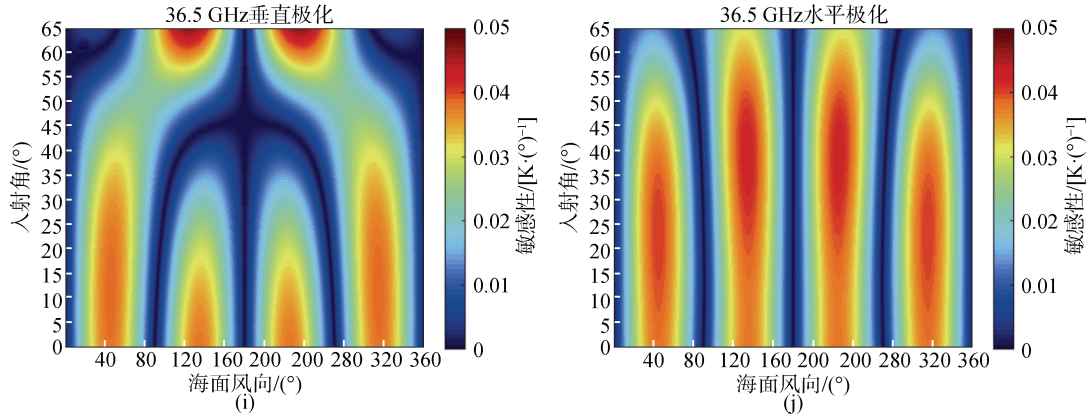
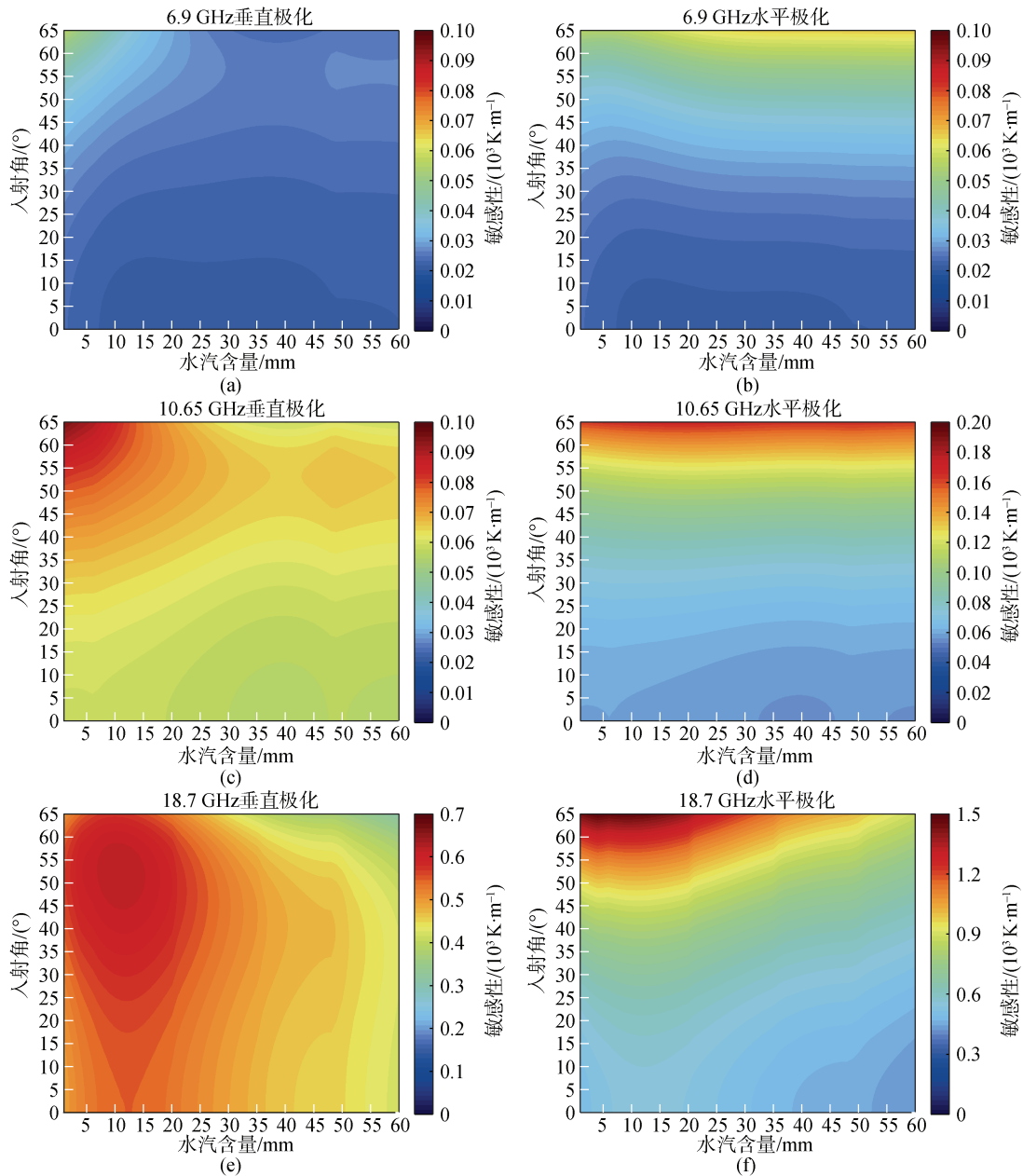


图 5 亮温对海面风向的敏感性

Fig. 5 Sensitivity of the brightness temperature to the sea surface wind speed



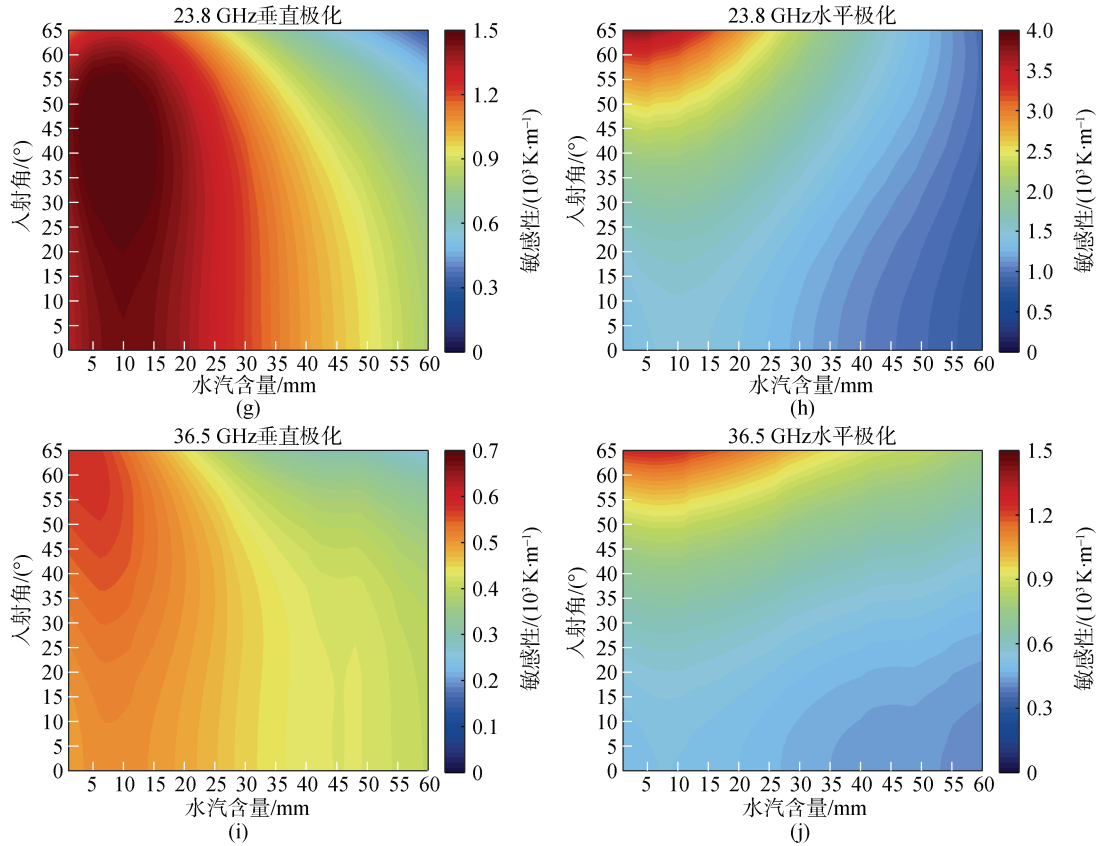


图 6 亮温对水汽含量的敏感性

Fig. 6 Sensitivity of the brightness temperature to the water vapor content

大气水汽含量的敏感性较低, 这表明 6.9 和 10.65 GHz 对大气水汽含量反演的影响很小。总的来说, 6.9 和 10.65 GHz 对大气水汽含量的敏感性随着入射角的增大而增大, 其最大值小于 0.2 K/mm。

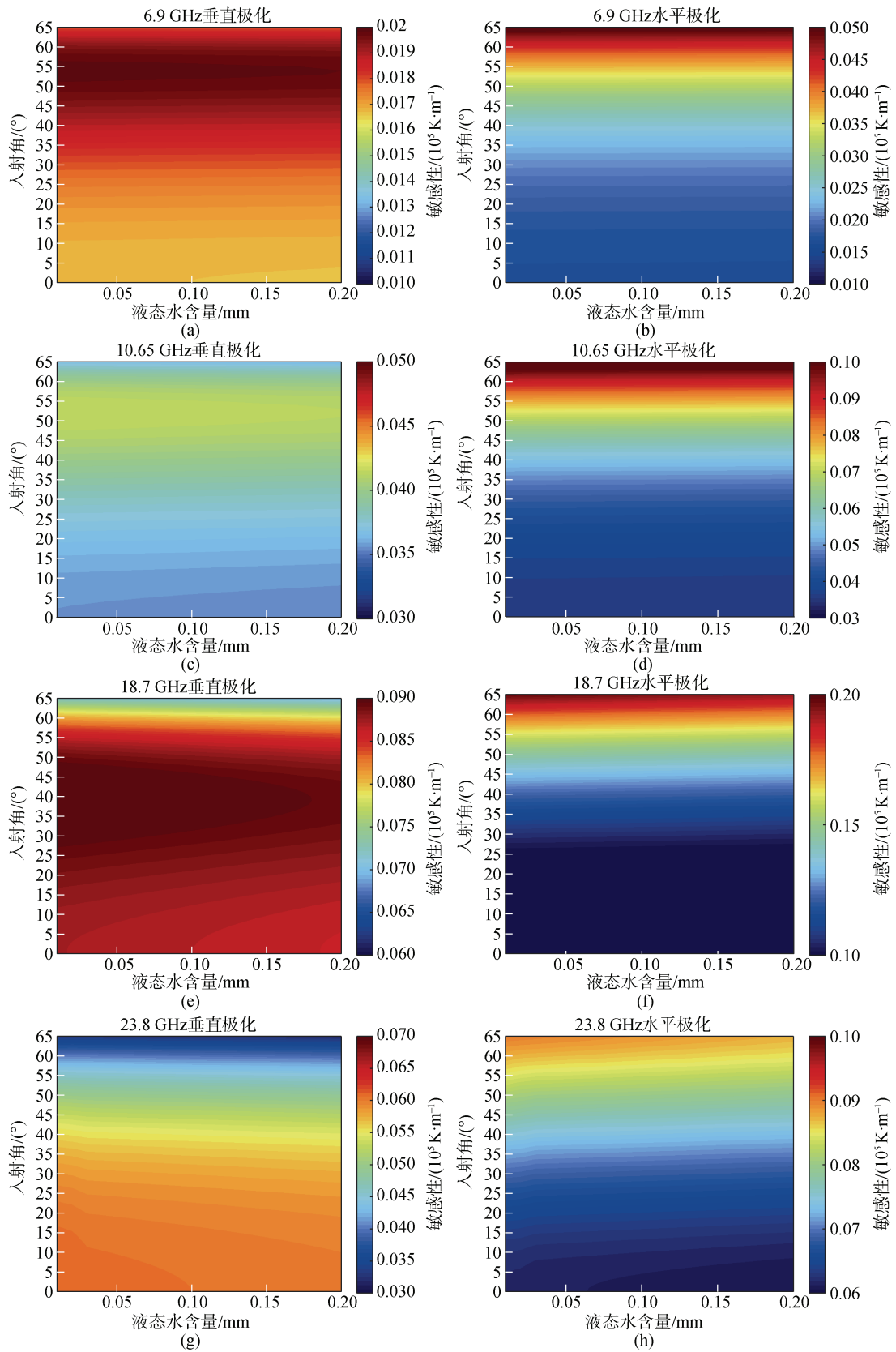
由于 23.8 GHz 位于水汽的吸收带^[29], 其对大气水汽含量的敏感性最大, 所以 23.8 GHz 是反演大气水汽含量的核心频率。23.8 GHz 水平极化亮温对大气水汽含量的敏感性最大值约为 4 K/mm ($V=1$ mm, $\theta=65^\circ$)。18.7, 23.8 和 36.5 GHz 对大气水汽含量的敏感性具有相似的特点, 即敏感性随水汽含量和入射角的变化趋势相似。

WindSat 提供的大气水汽含量数据是通过 18.7, 23.8 和 36.5 GHz 垂直和水平极化亮温反演得到的, 其没有采用 6.9 和 10.65 GHz 的原因有两个: (a) 6.9 和 10.65 GHz 对大气水汽含量的敏感性较低, 对提升大气水汽含量的反演精度影响不大; (b) 由于 6.9 和 10.65 GHz 的空间分辨率较低, 采用这两个频率进行反演会降低产品的空间分辨率。由于一维综合孔径微波辐射计的空间分辨率较高, 所以应采用所有频点

反演大气水汽含量。从图 6 可以得出, 18.7, 23.8 和 36.5 GHz 垂直极化亮温对大气水汽含量的敏感性在 $V \leq 35$ mm 内较大, 在 $V \geq 35$ mm 范围内, 敏感性相对较小。但是其敏感性在 $0^\circ \sim 65^\circ$ 范围内差别很小。这说明在 $V \leq 35$ mm 范围内, 18.7, 23.8 和 36.5 GHz 垂直极化亮温对反演大气水汽含量的影响最大。18.7, 23.8 和 36.5 GHz 水平极化亮温对大气水汽含量的敏感性在 $V \leq 25$ mm 和 $50^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ 范围内较大, 这表明在这个范围内, 18.7, 23.8 和 36.5 GHz 水平极化亮温对反演大气水汽含量的影响较大。

2.2.2 云液态水含量敏感性分析

根据场景 5 计算了亮温对大气水汽含量在 $0^\circ \sim 65^\circ$ 范围内的敏感性(图 7)。从图 7 中可以看出亮温对云液态水的敏感性随入射角的增大而增大, 随着液态水含量的增大, 但其变化不明显。6.9, 10.65 和 18.7 GHz 的垂直极化亮温对云液态水的敏感性的最大值没有出现在 65° 处, 例如图 7e 中最大值的位置在 $28^\circ \sim 48^\circ$ 内。23.8 和 36.5 GHz 的垂直极化亮温对云液态水的敏感性随入射角的增大而减小, 水平极化亮温对云



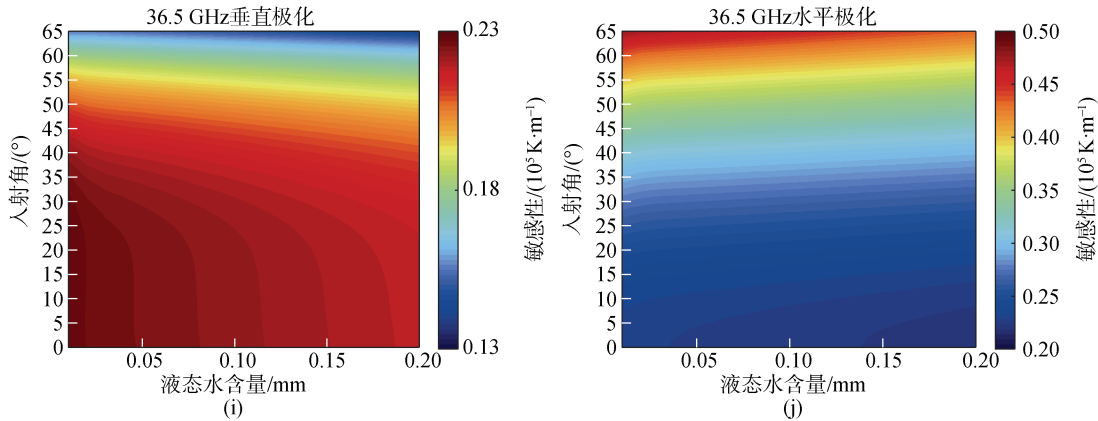


图 7 亮温对云液态水含量的敏感性

Fig. 7 Sensitivity of the brightness temperature to the cloud liquid water content

液态水的敏感性随入射角的增大而增大。总的来说，水平极化亮温的敏感性大于垂直极化亮温，且 36.5 GHz 对云液态水含量的敏感性最大，该频点是反演云液态水含量的主要频点。

3 结论

本文提出采用一维综合孔径微波辐射计遥感大气海洋环境参数，假设该一维综合孔径微波辐射计的观测频率为 6.9, 10.65, 18.7, 23.8 和 36.5 GHz，并且其入射角在 0°~65°之间。本文针对其观测频率和多人射角的特点，以辐射传输正演模型为基础，开展了亮温对海面温度，海面风速，海面风向，水汽含量和云液态水含量的敏感性分析。结果如下：

(1) 亮温对海面温度的敏感性: 6.9 和 10.65 GHz 对海面温度的敏感性较高。当入射角一定时，6.9 和 10.65 GHz 对海面温度的敏感性随海面温度的增加而增加，但是 18.7, 23.8, 36.5 GHz 对海面温度的敏感性随海面温度先减小后增加，说明在相同的亮温测量精度下，低海温的反演误差大于高海温。当海面温度一定时，6.9 和 10.65 GHz 的垂直极化亮温对海面温度的敏感性随入射角的增加而增加，其水平极化亮温对海面温度的敏感性随入射角的增大而减小。18.7, 23.8, 36.5 GHz 的垂直极化亮温对海面温度的敏感性与入射角的关系在不同的海面温度范围内表现不同。

(2) 亮温对海面风矢量的敏感性: 水平极化亮温对海面风速的敏感性大于垂直极化亮温，其中 10.65, 18.7 和 36.5 GHz 对海面风速的敏感性较大，23.8 GHz 的敏感性最小。所有频点的亮温对海面风速的敏感性表现相似。在 25 m/s ≤ W ≤ 30 m/s 范围内，

亮温对海面风速的敏感性随海面风速的增加几乎不变，这表明在这个范围内风速与亮温呈线性关系。亮温对海面相对风向的敏感性较小，其最大值均小于 0.05 K/(°)，且敏感性随海面相对风向呈波动特征。

(3) 亮温对大气环境要素的敏感性: 水平极化亮温对大气水汽含量的敏感性大于垂直极化亮温。6.9 和 10.65 GHz 对大气水汽含量的敏感性较低，其最大值小于 0.2 K/mm。23.8 GHz 对大气水汽含量的敏感性最大，其水平极化亮温对大气水汽含量的敏感性最大值大约为 4 K/mm。18.7, 23.8 和 36.5 GHz 对大气水汽含量的敏感性具有相似的特点。亮温对云液态水的敏感性随入射角的增大而增大，但是随着液态水含量的增大，其变化的不明显。36.5 GHz 对云液态水含量的敏感性最大，其水平极化亮温对云液态水的敏感性最大可以达到 0.45 K/(0.01 mm)。

致谢: 感谢 Wentz 提供的海面发射率模型。

参考文献:

- [1] YAO P, WAN J, WANG J, et al. Satellite retrieval of hurricane wind speeds using the AMSR2 microwave radiometer[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33: 1104-1114.
- [2] MEISSNER T, WENTZ F. Ocean retrievals for WindSat: radiative transfer model, algorithm, validation[C]. Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE, 2005: 130-133.
- [3] LILJEGREN J C, CLOTHIAUX E E, MACE G G, et al. A new retrieval for cloud liquid water path using a ground-based microwave radiometer and measurements of cloud temperature[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D13): 14485-14500.
- [4] BOBYLEV L P, ZABOLOTSKIKH E V, MITNIK L M, et al. Atmospheric water vapor and cloud liquid water

- retrieval over the arctic ocean using satellite passive microwave sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 283-294.
- [5] GAISER P, GERMAIN K, TWAROG E, et al. The WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2004, 42: 2347-2361.
- [6] WENTZ F J, MEISSNER T. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) AMSR Ocean Algorithm, Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA, Tech. Rep. 2000, 121599A-1.
- [7] SCHANDA E. Multiple wavelength aperture synthesis for passive sensing of the earth's surface[C]. 1979 Antennas and Propagation Society International Symposium, 1979: 762-763.
- [8] RYLEC M. The New Cambridge Radio Telescope[J]. *Nature*, 1962, 194(4828): 517-518.
- [9] RUFC C S, SWIFT C T, TANNER A B, et al. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the Earth[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(5): 597-611.
- [10] VINE D M L. The sensitivity of synthetic aperture radiometers for remote sensing applications from space[J]. *Radio Science*, 1990, 25(4): 441-453.
- [11] KILIC L, PRIGENT C, AIRES F, et al. Expected performances of the copernicus imaging microwave radiometer (CIMR) for an all-weather and high spatial resolution estimation of ocean and sea ice parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(10): 7564-7580.
- [12] WANG Rui, SHI Shunwen, YAN Wei, et al. Sea surface wind retrieval from polarimetric microwave radiometer in typhoon area[J]. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition*, 2014, 57: 738-751.
- [13] 陈冠宇, 艾未华, 陆文, 等. 一维综合孔径微波辐射计遥感海面温度的敏感性分析[J]. *海洋学报*, 2019, 41(3): 143-154.
CHEN Guanyu, AI Weihua, LU Wen, et al. Sensitivity analysis of remote sensing of sea surface temperature by one dimensional synthetic aperture microwave radiometer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(3): 143-154.
- [14] MEISSNER T, WENTZ F J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3004-3026.
- [15] MEISSNER T, WENTZ F J. Wind-vector retrievals under rain with passive satellite microwave radiometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3065-3083.
- [16] YUEH S H, WILSON W J, LI F K. Modelling of wind direction signals in polarimetric sea surface brightness temperatures[C]. *IGARSS'96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1996: 1132-1134.
- [17] GASIEWSKI A J, KUNKEE D B. Polarized microwave emission from water waves[J]. *Radio Science* 5V 29, 1994, 6: 1449-1466.
- [18] IRISOV V G. Small-slope expansion for thermal and reflected radiation from a rough surface[J]. *Waves in Random Media*, 1997, 7(1): 1-10.
- [19] MEISSNER T, WENTZ F J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(9): 1836-1849.
- [20] ROSENKRANZ P W. Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models[J]. *Radio Science*, 1998, 33(4): 919-928.
- [21] LIEBE H J, ROSENKRANZ P W, HUFFORD G A. Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum: New laboratory measurements and line parameters[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1992, 48(5): 629-643.
- [22] HOLLINGER J P. Passive microwave measurements of sea surface roughness[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1971, 9(3): 165-169.
- [23] 金梦彤, 刘浩, 武林, 等. 星载一维综合孔径微波辐射计海洋盐度探测任务仿真及外部误差源分析[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(2): 346-355.
JIN Mengtong, LIU Hao, WU Lin, et al. Task simulation and external error sources analysis for an ocean salinity mission with one-dimensional synthetic aperture microwave radiometer[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(2): 336-355.
- [24] 刘泽霖. 综合孔径微波辐射计大气温度廓线直接反演算法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
LIU Zelin. An algorithm for retrieving atmospheric temperature profiles directly from visibility function of aperture synthetic microwave radiometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [25] VORONVICH A G, GASIEWSKI A J, WEBER B L. A fast multistream scattering-based Jacobian for microwave radiance assimilation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1749-1761.
- [26] ALSWEISS S O, JELENAK Z, CHANG P S. Remote sensing of sea surface temperature using AMSR-2 measurements[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(9): 3948-3954.
- [27] GENTEMANN C, WENTZ F, MEARS C, et al. In situ

- validation of tropical rainfall measuring mission microwave sea surface temperatures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109.
- [28] GENTEMANN C, MEISSNER T, WENTZ F. Accuracy of satellite sea surfacetemperatures at 7 and 11 GHz[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48: 1009-1018.
- [29] LIEBE H J. An updated model for millimeter wave propagation in moist air[J]. *Radio Science*, 1985, 20: 1069-1089.

Sensitivity analysis of atmospheric and oceanic environmental parameters based on one-dimensional synthetic aperture microwave radiometer

FENG Meng-yan¹, AI Wei-hua¹, LIU Mao-hong¹, CHEN Guan-yu², LU Wen¹

(1. National University of Defense Technology, College of Meteorology and Oceanography, Nanjing 210000, China; 2. PLA Troop 32033, Haikou 570100, China)

Received: Jul. 20, 2020

Key words: one-dimensional synthetic aperture microwave radiometer; high spatial resolution; multiple incidence angles; sensitivity analysis

Abstract: Compared with the real-aperture microwave radiometer, the one-dimensional synthetic aperture microwave radiometer has the characteristics of high spatial resolution and multiple incidence angles. This paper proposes a one-dimensional synthetic aperture microwave radiometer operating at observation frequencies 6.9, 10.65, 18.7, 23.8, and 36.5 GHz and an incidence angle range from 0° to 65° to obtain the atmospheric and oceanic environmental parameters. The sensitivity of the polarization brightness temperature to atmospheric and oceanic environmental parameters is evaluated based on the constructed microwave radiation transmission forward model. This research technically supports in determining the key indicators of the radiometer and the retrieval algorithm design. Results show that the sensitivity of the vertical and horizontal polarization brightness temperatures to the environmental parameters shows different characteristics and varies significantly with the incidence angle (0°~65°). The polarization brightness temperature becomes more sensitive to the sea surface temperature at 6.9 and 10.65 GHz, and the sensitivity of the vertical polarization brightness temperatures increases with the incidence angle. The polarization brightness temperature of 10.65 and 18.7 GHz have a relatively large sensitivity to the sea surface wind speed, and The sensitivity is greatest when the wind speed is within 10~20 m/s. The polarization brightness temperature is the most sensitive to atmospheric water vapor content at 23.8 GHz, the sensitivity is large when the water vapor content is low and the incidence angle is large. 36.5 GHz is the most sensitive to cloud liquid water content, and the sensitivity of vertical polarization brightness temperature is opposite to that of horizontal polarization brightness temperature whose sensitivity increases with the incidence angle. In addition, both of them show greater sensitivity when the cloud liquid water content is low.

(本文编辑: 康亦兼)